

制御教育用教材 MCORE-IP の紹介と活用事例

Introduction of a Teaching Material MCORE-IP for Control Education and its Applied Cases

川谷 亮 治^{※1}
Ryoji KAWATANI

高田 直 人^{※2}
Naoto TAKADA

1. はじめに

制御理論の修得において、机上で学ぶ、あるいは学んだ理論を実践できる制御教育用教材の果たす役割は大きい。そのような目的で、これまでに数多くの教材が製作され、活用されてきた。その中でも、倒立振り子は最もよく知られた実験装置の一つである。倒立させる振り子の本数や操作力の与え方など様々な方式があり、それぞれに制御の難易度も異なる。教育という立場での倒立振り子系の最大の特長として、制御目的が明確でわかりやすい点を挙げることができる。本報で取り上げる倒立振り子系を図1に示すが、二輪独立駆動型自律移動ロボットの本体を倒立させてバランスをとるタイプ（車輪駆動型倒立振り子系）である（同様の実験装置はZMP¹⁾やヴィストン²⁾などから市販されている）。

以降では、本系をMCORE-IPと呼ぶ。2つある駆動

輪を制御することで、本体を倒立させることができるだけでなく、それらに独立に指令を与えることで、平面内を移動（直進や回転）させることが可能である。また、装置の可搬性が高く、小型化できるという特長をもち、制御教育用教材として適したものの一つであると考え、本報では、MCORE-IPの紹介を行うとともに、制御教育という立場での活用事例を示す。

2. 制御教育用教材

2.1 MCORE-IPの基本構成

MCORE-IPの基本構成を以下に示す。

(1) 制御用マイコンボードTK400SH

SH7125F（ルネサスエレクトロニクス）を搭載したオリジナルのマイコンボードである³⁾（図2）。MCORE-IP開発当初は、メカトロ教育を目的として別に開発されていたマイコンボードTK400A（H8/3694F（ルネサスエレクトロニクス）を搭載）⁴⁾を利用していましたが、演算処理速度ならびにロータリーエンコーダからの出力パルスの処理のために別にマイコンが必要となる、という問題点を解消する目的で新たに開発した。TK400Aと比べて基板のサイズが若干大きくなる（10cm×11.5cm）が、浮動小数点の処理速度は約5倍になり、2個のロータリーエンコーダからの信号を直接受け取ることが可能となる。また、TK400Aとの互換性を強く意識した設計であるため、TK400Aと同様に、メカトロ教育用としても利用可能である。

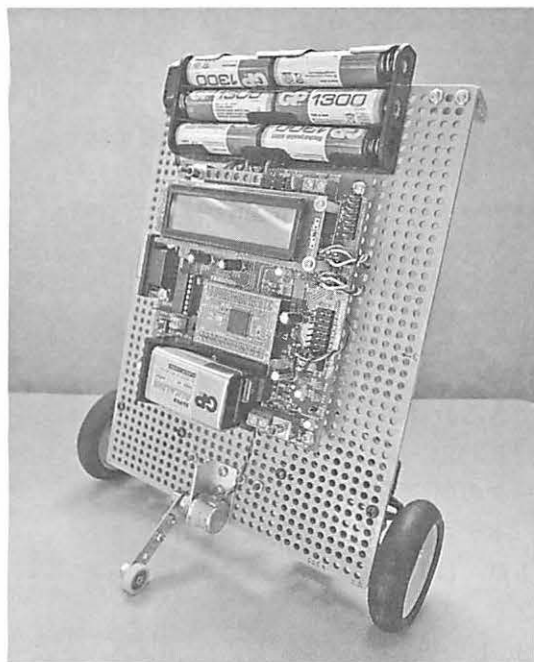


図1 車輪型倒立振り子系MCORE-IP

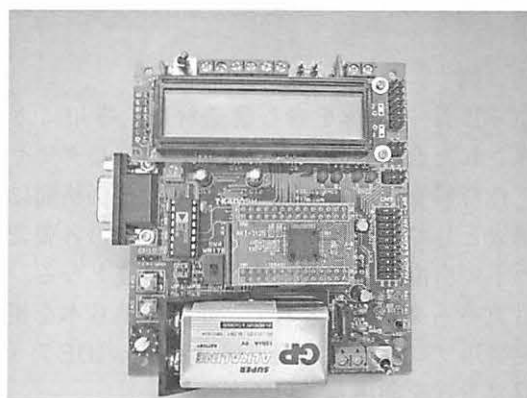


図2 制御用マイコンボードTK400SH

2012年10月1日受付

※1 福井大学大学院工学研究科

※2 長野県飯田工業高等学校

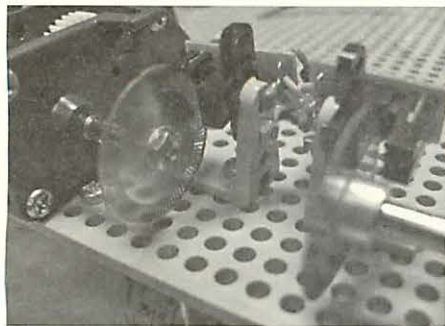


図3 ロータリーエンコーダ

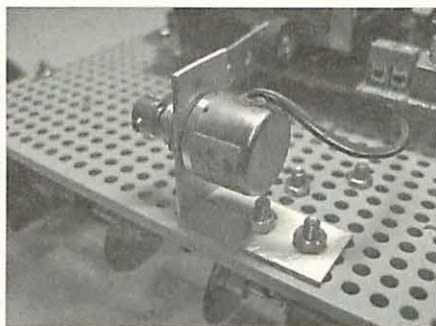


図4 ポテンショメータ

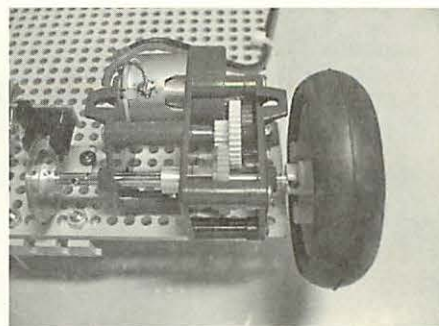


図5 直流モータとギヤボックス

(2) センサ

駆動輪と本体の回転角を計測することで本系の可観測性を保証できる。前者に対しては、各駆動輪独立にロータリーエンコーダ（BTE030：ベストテクノロジー、分解能は360ppr）を車軸と同軸に取り付けてある（図3）。また、後者に対しては、ポテンショメータ（CP-2UN：緑測器）を利用している（図4）。これを本体に固定し、その回転軸に軽量のアームをとりつけ、もう一方をベアリングを介して床に接地させることで、床と本体との相対角度を検出する（図1参照）。なお、ジャイロセンサ（XV3500：エプソントヨコム）を利用した制御も可能であるが、本報では説明は省略する。

(3) アクチュエータ

アクチュエータとして、2個の直流モータ（ハイパワーギヤボックスHE（ギヤ比41.7:1）：タミヤ）とナロータイヤセット（タミヤ）を利用する（図5）。TK400SHには2個のモータドライバが標準搭載されており、それらにより各直流モータを個別にPWM制御できる。

(4) 無線通信

パソコン（以下、PC）上で開発した制御用プログラムのTK400SHへの書き込みや実験中のデータのPCへの送信を目的として、XBEE（スイッチサイエンス）を本体に取り付けて、TK400SHとシリアルケーブルで接続している。無線を利用することで、制御用プログラムの書き込み時にMCORE-IPをPC付近へ移動させ、ケーブル接続する必要がなく、また、制御対象の動作に影響を与えずに、実験データの取得が可能となる。

(5) その他

MCORE-IPの本体を含む構造材は、専用にカスタマイズされたものではなく、入手が容易なタミヤの模型用工作材料を使用しており、汎用性と価格面に配慮した構成としている。これにより、上記の各要素のレイアウトに自由度を持たせることが可能となる。電池は、直流モータ駆動用として、単3電池6本を使用する。制御用プログラム開発環境はYellowIDE7（イエローソフト）を利用している。

2.2 テキスト

MCORE-IPは、利用者が制御理論の初学者であることを想定して開発したシステムである。大学等の授業で制御の具体例として活用してもよいが、学習者一人一人がそれぞれの学習環境の中で、MCORE-IPと向き合い、様々な体験を通して自学習を進めていく、というのが望ましい学習形態であると考える。

そのために、以下に示すテキストを用意している（なお、現在作成中のものも一部含まれる）。

- (1) TK400SH製作マニュアル
- (2) MCORE-IP製作マニュアル
- (3) TK400SH用ライブラリ説明書
- (4) 制御学習用テキスト

MCORE-IPは、完全キットでの提供を想定している。(1)と(2)は製作の際に必要な。なお、(2)には学習を進めていく際に利用するソフトウェアのインストール手順も含まれている。また、制御用プログラム開発を容易にするために、TK400SH専用のライブラリ関数を作成してある。それを説明しているのが(3)である。

制御理論を学習するためには、市販されている多くの本が参考になるが、それらにまとめられている内容は一般論である。そこで、MCORE-IPに限定して、モデリングから制御器の実装までをまとめたのが(4)の学習用テキストである。筆者の一人が行っている制御に関するセミナーを通して、フィードバック制御の体験だけでなく、モデルのもつ物理パラメータの同定を体験できる教材の必要性が高い。そこで、本テキストには、MCORE-IPに対するモデル内に含まれる物理パラメータの同定手順を具体的にまとめてある。参考までに、本テキストの目次を以下に示す。

第1章 はじめに

第2章 モデリング

2.1 基本構成

2.2 状態空間モデル

第3章 物理パラメータの同定

3.1 センサゲイン

3.2 力学系のパラメータ

3.3 電気系のパラメータ

3.4 数値状態空間モデル

第4章 状態空間モデルの解析と制御器設計

4.1 漸近安定性

4.2 可制御性

4.3 状態フィードバック制御

極配置法, 最適レギュレータ法

4.4 状態オブザーバ

全状態オブザーバ, 最小次元オブザーバ

4.5 設計例

第5章 制御器のマイコンへの実装

5.1 タイマー割り込み

5.2 状態フィードバック制御

5.3 全状態オブザーバを利用した制御

5.4 プログラム例

5.5 設計例

第6章 おわりに

ところで, モデリングから実装までの一連の設計プロセスをテキスト等に基づいて体験していく際に, 制御系解析・設計用ソフトウェアのサポートが必須であることは言うまでもない。(4)の学習用テキストでは, その目的で, フリーソフトであるMaximaとScilabを利用している⁵⁾。前者は数式処理ソフトで, モデリングからそれに対する解析までを担当し, 後者は数値処理ソフトで, パラメータ同定から制御器設計・シミュレーション評価までを担当となる。

3. 活用事例

MCORE-IPを活用した制御教育の標準的な例とその概要を示す。筆者らはこれまでに, 5名(内訳は大学学部生(2名), 高専専攻科生(1名), 社会人(2名))に対する教育事例をもつが, その経験に基づいてまとめたものである。()内には各節の学習に必要と思われる時間を示してあるが, あくまでも目安程度であり, 学習者をもつ事前知識等によって大きく異なる可能性がある。

3.1 準備(12時間)

ここでは, TK400SHとMCORE-IPの製作をマニュアルに基づいて行うとともに, マイコンのプログラム開発環境であるYellowIDE7, フリーソフトMaxima, Scilabなどのインストールを行う。また, XBEEの設定を行い, 無線が利用できる環境を構築しておく。

3.2 モデルの導出(6時間)

ラグランジュ法に基づき, 連立非線形微分方程式を導出する。それに対して, 平衡点まわりでの線形化を施すことで, 状態空間モデルを導出する。これらの作業はMaximaを利用することができる。そのため, Maximaの基本操作の理解も並行して行う。また, 状態空間モデルをもつ同定すべき物理パラメータの一覧表を作成する。

3.3 パラメータ同定(30時間)

MCORE-IPがもつ同定すべき物理パラメータは, センサゲインと力学系・電気系パラメータに大別できる。以下, 主だったものについて順に説明する。なお, 作業の際に, Scilabを利用するため, その理解も並行して行う。

(1) センサゲイン

ポテンシオメータに対しては, 最小二乗法に基づき, そのゲインを同定する。最小二乗法は, パラメータ同定の基本となるので, 原理を理解しておくことは重要である。ロータリーエンコーダは, 分解能が決まっているので, そのゲインは計算で求めることができる。同定の際のデータ計測はTK400SHを利用して行うため, センサデータの取得ならびにデータをPCに送信するマイコンプログラムの理解も併せて行う。

(2) 力学系パラメータ

本体やタイヤの質量は, はかりを利用することで計測できる。タイヤの慣性モーメントは, タイヤを円柱と近似することで計算により求めることができる。本体の重心位置についてはナイフエッジ法等が利用できる。したがって, 同定しなければならない残るパラメータは本体の重心まわりの慣性モーメントと粘性抵抗係数である。

MCORE-IPは回転軸と同軸にエンコーダを取り付けてあるので, 回転軸に対して本体をぶら下げた状態での自由振動実験を通してこれらのパラメータの同定が行える。図6に自由振動実験の結果を示す。横軸が時間, 縦軸が本体回転角を表している。

これに対して, 最小二乗法を利用して, 最も適合する式(1)に示す時間関数内のパラメータ $a_0 \sim a_4$ を決定する。なお, 自由振動を表す関数が式(1)で与えられることは, 前節で導出した微分方程式から得られる2階線形微分方程式を解くことで示すことができる。

$$\theta = a_0 + a_1 e^{-a_2 t} \cos(a_3 t + a_4) \quad (1)$$

得られた関数を図6に点線で示しているが, 実験結

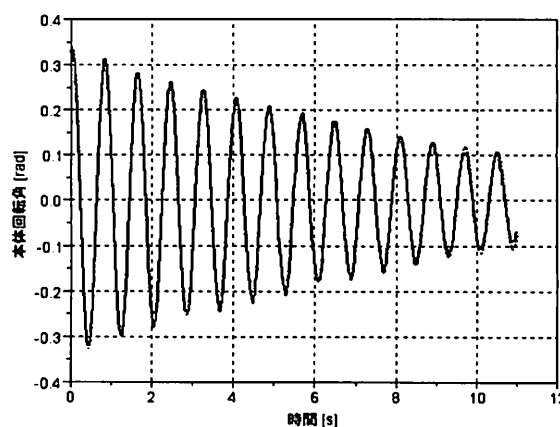


図6 自由振動実験

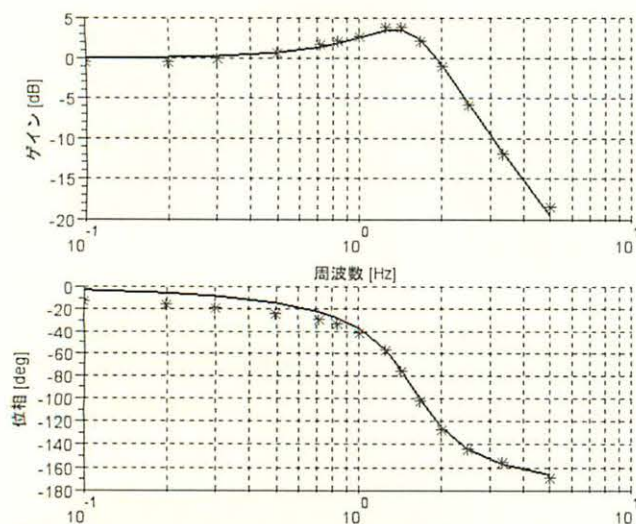


図7 周波数応答

果とほとんど区別することができない程度に一致している。同定したパラメータから、回転軸回りに関する本体の慣性モーメントと粘性抵抗係数が得られる。

(3) 電気系パラメータ

アクチュエータとして使用する直流モータの逆起電力定数 (=トルク定数) を実験により同定する。ここでは周波数応答法を利用する。これにより、古典制御で重要になる周波数応答の計測を実体験できる。

実験方法は、直流モータに比例制御系を構成し、目標入力として所定の角周波数をもつ正弦波を与え、ロータリーエンコーダを利用して直流モータの回転角を計測する。これらの入出力関係からゲインと位相を求める。その際に、フーリエ積分を利用する。この実験を、目標入力の角周波数を変更して繰り返し行う。その結果として、周波数応答が得られる。図7に得られた実験結果を*で示す。上図がゲイン線図、下図が位相線図である。また、横軸は周波数 [Hz] としている。

これに対して、最小二乗法に基づき、最も適合する伝達関数を決定し、その周波数応答を示したのが図7の実線である。MCORE-IPに搭載している直流モータは玩具用のものであり、静摩擦やギヤのバックラッシュ等の非線形特性を含む。そのために、位相特性に対して低周波数帯域に差がみられるが、全体的に両者はよく一致しており、同定は正しく行われているものと判断する。

なお、MCORE-IPの制御とは直接関係ないが、直流モータ系は、P、PI、PID制御などの古典制御の学習用としても利用可能である。

(4) 数値状態空間モデル

以上により、前節で導出した状態空間モデルがもつ物理パラメータのすべてを同定できる。結果として、式(2)に示す(数値)状態空間モデルを得る。

$$\begin{cases} \dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 55.76 & 0 & -0.06189 & -1.442 \\ 75.73 & 0 & 2.226 & -13.52 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 18.17 \\ 153.3 \end{bmatrix} v \\ y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} x \end{cases} \quad (2)$$

3.4 制御器設計ならびに評価 (20時間)

式(2)が不安定であることは、Scilabを利用してその極を調べることで確認できる。また、可制御性ならびに可観測性を満たすことも同様に確認できる。その上で制御器の設計に取り組む。

(1) 状態フィードバック制御

状態フィードバックゲインを設計する方法として、線形制御理論は、極配置法と最適レギュレータ法を与えてくれている。これらの理論を理解した上で、Scilab上で設計ならびにシミュレーションを行い、極の役割や重み行列の選定方法を理解する。

(2) オブザーバベースド制御

MCORE-IPは状態量すべてを検出するためのセンサを用意していない。そのため、センサからの出力だけを利用して制御を行う場合、状態オブザーバが必要となる。ここでは、全状態オブザーバ、最小次元オブザーバ、汎関数オブザーバについて設計法や制御性能に関する検討を行う。

ところで、ScilabにはXCOSという非線形シミュレータが標準で用意されている。これは、非線形微分方程式をブロック線図で表現できるため、非線形シミュレーションが行えるだけでなく、制御系の信号の流れを理解する目的には有効である。シミュレータは応答評価には欠かすことのできない道具なので、この時点で理解しておくことが好ましい。

3.5 制御器の実装 (6時間)

MCORE-IPに対して制御実験を行うためには、前節で設計した制御器を離散化する必要がある。また、一定のサンプリング時間を実現するために、マイコンのタイマー割り込みについて理解する必要がある。サンプルプログラムを利用して、これらのことについて理解する。

3.6 制御実験 (10時間)

制御実験に取り組む。

状態フィードバック制御を適用する場合、センサで直接入手することができない角速度情報を制御プログラム内で差分を利用して作り出す必要がある。しかし、MCORE-IPに搭載されているロータリーエンコーダは分解能が低いために、平衡状態近傍では差分操作により観測ノイズが多く発生する。この影響は実験を通して確認できる。対処療法的であるが、計算された操作量に対してローパスフィルタを通したのちMCORE-IPに与えることで、その影響が低減できることを確認できる。オブザーバを利用する場合、このような処理

は不要である。

制御実験結果は、無線でPCに送信できるので、実験結果をPC上に表示し、理論結果と比較を行うことが可能である。一例を図8に示す。これは全状態オブザーバを利用した制御実験結果（操作量にステップ状の信号を加えたときの応答）である。上図が本体回転角であり、下図が駆動輪回転角である。また、実線が理論結果であり、点線が実験結果を意味している。これらが一致することが望ましいが、実際には必ず違いが生じる。その理由を考察するのはよい学習題材である。

たとえば、図8では、定常状態において、理論結果が一定値になっているのに対して、実験結果は周期的に動いている（なお、駆動輪回転角の実験結果が8s以降、一定の値になっているが、これは偶然本体部が平衡状態近傍で停止したためである）。これは、アクチュエータがもつ非線形特性に起因していると考えられる。図8に示しているのは線形シミュレーションの結果であるが、アクチュエータ部に不感帯があると仮定してXCOSを利用して非線形シミュレーションを行った結果を図9に示す。両者が類似していることがわかる。

参考までに、図9のシミュレーションの際に使用し

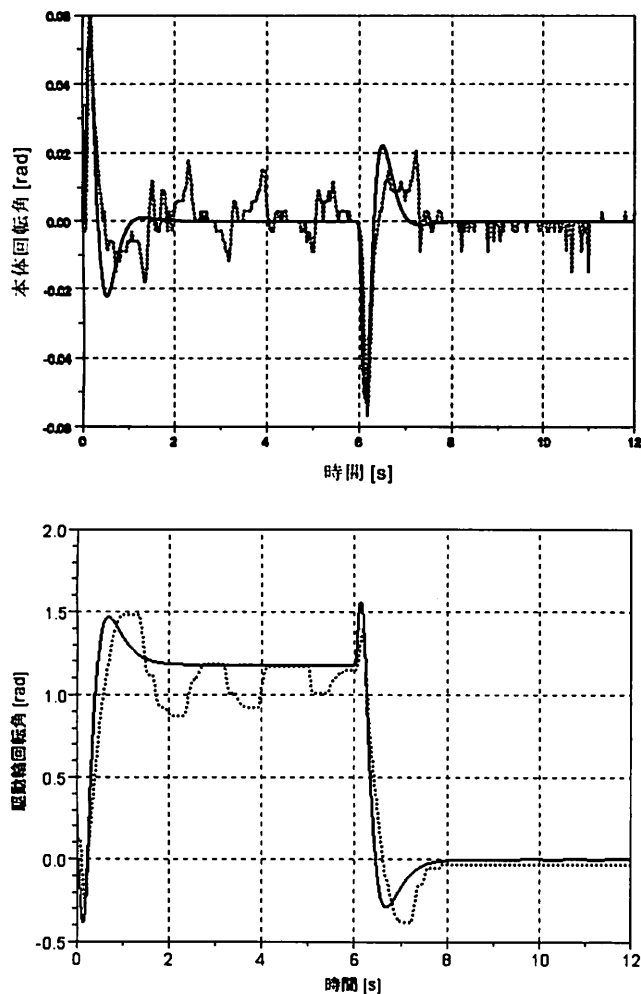


図8 ステップ応答（線形シミュレーション）

たXCOSのブロック線図を図10に示す。本シミュレーションでは、不感帯を入れただけでなく、ロータリーエンコーダの分解能を考慮し、制御器も離散化したものを使用しているという意味で、より現実的なシミュレータとなっている。

3.7 以降

MCORE-IPはユニバーサルプレートを利用して製作されているため、レイアウトを変更することで、他の構成の実験装置に組み替えることが可能である。一例を図11に示す。これは直流モータ駆動の台車上に置

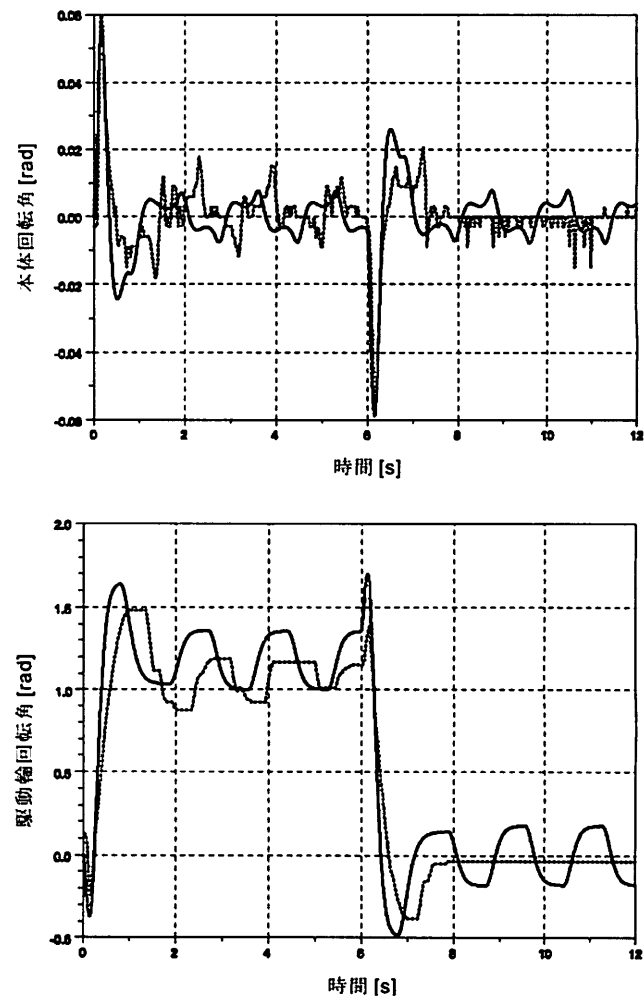


図9 ステップ応答（不感帯を考慮）

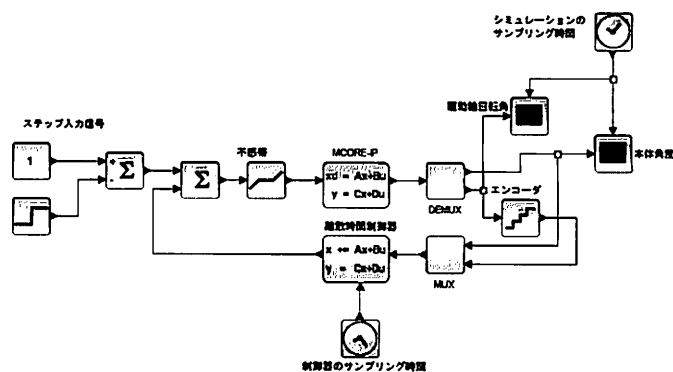


図10 XCOSで作成した非線形シミュレータ

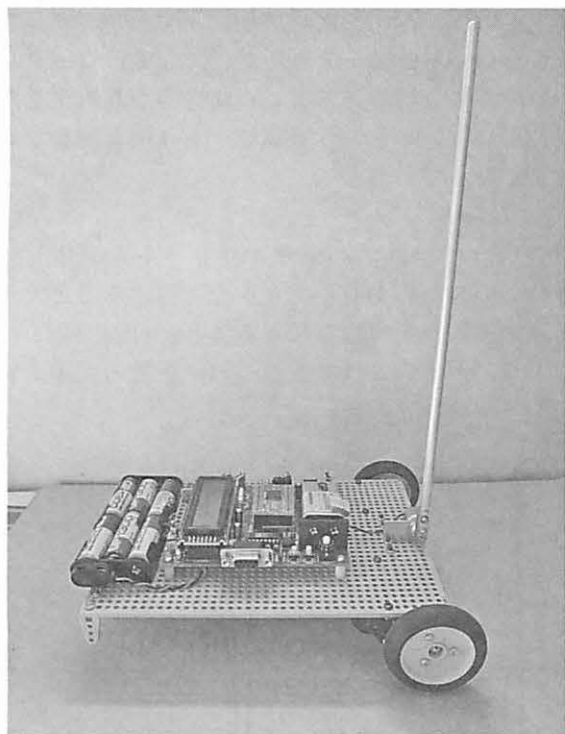


図11 応用課題の一例（台車型倒立振り子系）

かれた振り子を倒立させることを目的とした台車型倒立振り子系である。

前節までで示した学習を終了後は、このような応用課題に挑戦することもよい学習につながると考える。また、前節までは基本的な線形制御理論の学習が主目的であった。一方、ロバスト制御⁶⁾やLMI設計法⁷⁾などに代表される種々の制御理論がこれまでに構築されている。これらに基づいてMCORE-IPに対する制御器設計に挑戦するのも知識や経験を増やす目的で有効であると考ええる。

4. おわりに

本報では、筆者らが開発した車輪駆動型倒立振り子系MCORE-IPの紹介を行うとともに、制御教育への活用事例を示した。MCORE-IPは不安定な制御対象であるため、学習者の興味を引きやすい題材であり、可搬性が高いなど、利点を有する。また、系を構成する各要素のレイアウトを変更することで、様々な系に変更が可能である。これまでに構築されている制御理論はそ

れぞれに特長をもつ。今後は、それらの特長を実感できる制御系の開発を行い、教育教材としての充実を図りたいと考える。

謝 辞

本研究を行うにあたり、株式会社MCORから多大なるご支援をいただいたことに感謝の意を表する。また、MCORE-IPを利用したeラーニングシステムも同社より開発されており、市場で活用されていることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 株式会社ゼットエムピー：倒立二輪ロボットの安定化と走行制御, <http://www.zmp.co.jp/e-nuvo/jp/wheel.html>
- 2) ヴィストーン株式会社：<http://www.vstone.co.jp/>
- 3) 川谷亮治, 高田直人：マイコンボードTK400SHとその応用事例の紹介, 第12回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp.1457-1460, 2011
- 4) 川谷亮治, 高田直人：マイコンボードTK400Aとそのメカトロ教育への適用事例, 平成24年度工学教育研究講演会講演論文集, pp.284-285, 2012
- 5) 川谷亮治：フリーソフトで学ぶ線形制御, 森北出版, 2008
- 6) たとえば, 藤森 篤：ロバスト制御, コロナ社, 2001
- 7) たとえば, 蛭原義雄：LMIによるシステム制御, 森北出版, 2012

著 者 紹 介



川谷 亮治

大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了。工学博士。同大学助手、講師、長岡技術大学工学部助教授を経て、現在、福井大学大学院工学研究科准教授。現代制御理論の応用に関する教育研究に従事。計測自動制御学会、システム制御情報学会、日本ロボット学会、日本機械学会などの会員。
r_kawa@u-fukui.ac.jp